

多通道亮温数据反演积分水汽算法^①于子平^{②*} 卢建平^{**} 杜运理^{③*} 王晋华^{*} 王东吉^{*} 雷连发^{**}

(* 中国兵器科学研究院 北京 100089)

(** 西安电子工程研究所 西安 710100)

摘 要 针对单通道微波辐射计测量水汽的不足,进行了用多通道辐射计分别测量不同频段的亮温的研究,提出了用多通道亮温数据反演大气积分水汽的算法。以此算法为基础,成功研制了 MWP967KV 国产双频段多通道微波辐射计,并于 2012 年用其对北京大气水汽进行了为期两个月的测量,同时与进口辐射计和探空数据进行了对比。试验结果表明,采用多通道亮温数据反演积分水汽的算法可以有效减少因液态水的强烈辐射特性造成的频段干扰,大气积分水汽的计算准确,晴天和雨雪天测量误差分别控制在 6% 和 8% 以内,计算测量精度对环境的依赖性小,具有高稳定性。

关键词 微波辐射计,水汽密度,湿度延迟,亮温

0 引 言

微波辐射计从最初用于噪声测量的宽频无线电接收装置逐渐发展成为可广泛用于探测大气温度、液态水含量等地表特征的重要仪器^[1],其本身并不发射电磁波,而是通过被动接收被观察场景辐射的能量来探测目标特征。普朗克量子理论指出,一切物质只要在绝对温度零度以上,任何时刻都会向外辐射电磁波。在微波波谱区,大气中主要的吸收物质为氧气、水汽和液态水,其中水汽主要分布在 K 波段辐射噪声中。虽然水汽在大气中比例仅为 0.1% ~ 4%,但是它对于云的生成、降水的形成和降雨强度的影响十分明显^[2],基于此,大气积分水汽测量研究具有实践意义。20 世纪主要采用单通道微波辐射计进行水汽的测量,后发现液态水的强烈辐射特性会对其测量结果造成较大的影响,经研究发现水汽和液态水分别占据不同的频谱^[3-5],因此若采用多通道辐射计分别测量不同频段的亮温,则可有效避免液态水的强烈辐射特性的影响^[6]。为此本文专门研究了由多通道辐射计测得亮温数据反演大气积分水汽的算法,先分析双通道积分水汽和大

气路径延迟的关系,后给出了利用亮温数据反演大气路径延迟求解积分水汽的算法并将之推广至多通道微波辐射计的设计,而且用研制的国产辐射计 MWP967KV 在北京进行了测量工作。与进口辐射计和探空测量数据对比后发现,采用此算法获得的结果精准有效,且具有较高的稳定性,基于此方法的辐射计的研制成功标志着国内已经具备独立测量降雨可能性的能力。

1 微波辐射计测量大气积分水汽

1.1 积分水汽提取算法

Elgered(1993)给出的大气路径延迟定义为光速和实际波速导致的光程差^[6],具体表达式为

$$\begin{aligned}
 PD &= \int c dt \\
 &= \int c \left(\frac{ds}{v} - \frac{ds}{c} \right) \\
 &= \int \left(\frac{c}{v} - 1 \right) ds \\
 &= \int N \times 10^{-6} ds
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中 N 为大气折射率^[7],且

① 公益性行业(气象)专项科研专项(GYHY201006030)资助项目。

② 男,1957年生,博士,研究员;研究方向:火炮技术,人工影响天气技术等;E-mail: yuzip@126.com

③ 通讯作者,E-mail: yunlidu@sina.com

(收稿日期:2013-10-28)

$$N = c_1 \frac{P_d}{T} + c_2 \frac{P_v}{T} + c_3 \frac{P_v}{T^2} \quad (2)$$

其中 T 为大气温度, P_d 为干燥空气气压, P_v 为蒸汽分压, 其值分别与干燥空气及水汽密度有关:

$$\begin{aligned} P_d &= \rho_d R_d T \\ P_v &= \rho_v R_v T \end{aligned} \quad (3)$$

将式(3)带入式(2)可得

$$\begin{aligned} PD &= 10^{-6} \left[c_1 \int \rho_d R_d ds + c_2 \int \rho_v R_v ds \right. \\ &\quad \left. + c_3 \int \rho_d \frac{R_d}{T} ds \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中 ρ_d 和 ρ_v 分别为干燥空气和水汽密度, R_d 和 R_v 分别为对应气体常数, 若认为空气密度 ρ 为水汽密度和干燥空气密度之和, 则有

$$\rho_d = \rho - \rho_v \quad (5)$$

$$PD = 10^{-6} \left[k_1 \int \rho ds + k_2 \int \rho_v ds + k_3 \int \frac{\rho_d}{T} ds \right] \quad (6)$$

其中:

$$\begin{aligned} k_1 &= c_1 R_d \\ k_2 &= c_2 R_v - c_1 R_d \\ k_3 &= c_3 R_d \end{aligned} \quad (7)$$

(6)式中第一项为静力延迟, 和空气密度有关, 可直接写出^[8]; 而第二项和第三项之和为湿度延迟, 和水汽密度密切相关:

$$PD_v = 10^{-6} \left[k_2 \int \rho_v ds + k_3 \int \frac{\rho_d}{T} ds \right] \quad (8)$$

积分方法定义的大气积分水汽公式可表示为

$$V = \int \rho_v ds \quad (9)$$

为求解式(9), 定义平均权重温度:

$$T_m = \frac{\int \rho_v ds}{\int \frac{\rho_v}{T} ds} \quad (10)$$

对应的积分水汽为

$$V = \frac{10^6 PD_v}{\left(k_2 + \frac{k_3}{T_m} \right)} \quad (11)$$

根据历史探空可知: $R_v = 4.613 \times 10^6 \text{ erg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$, $R_d = 2.8704 \times 10^6 \text{ erg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$, 将其带入式(7)后可得 $k_2 = 26.485$, $k_3 = (6.079 \pm 0.021) \times 10^5$, 带入式(11)后则可求通过湿度延迟求得积分水汽和水汽密度。

1.2 湿度延迟提取算法

大气遥感的基本方程^[9]为

$$T = T_\infty e^{\int_0^\infty \alpha \sec \theta dz} + \int_0^\infty T \alpha \sec \theta e^{\int_0^z \alpha \sec \theta dz} dz \quad (12)$$

其中 T_∞ 是宇宙背景的辐射亮温, θ 为天顶角, $T(z)$ 是高度 z 处温度。 $\alpha = \alpha_{\text{oxygen}} + \alpha_{\text{vapor}} + \alpha_{\text{liquid}}$ 为吸收系数, 右边分别为氧气, 水汽和液态水的吸收系数。其中宇宙背景亮温 $T_\infty = 2.7 \text{ K}$ 。以双通道微波辐射计为例, 推导路径延迟算法, 将两个通道测量亮温结果带入式(12)得

$$\begin{aligned} T_{B1} &= T_1 + \int_0^\infty T \alpha_1 \sec \theta e^{\int_0^z \alpha_1 \sec \theta dz} dz \\ T_{B2} &= T_2 + \int_0^\infty T \alpha_2 \sec \theta e^{\int_0^z \alpha_2 \sec \theta dz} dz \end{aligned} \quad (13)$$

后续带入 $ds = \sec \theta dz$ 用于求解计算。

D. H. Staelin 等人研究发现, 当辐射计工作频率 $f \leq 40 \text{ GHz}$ 时, α_{liquid} 正比于 f^2 , 比例系数为 k , 带入后得

$$\frac{T_{B1} - T_1}{f_1^2} - \frac{T_{B2} - T_2}{f_2^2} = \int_0^\infty W(s) \frac{\rho_v}{T} ds + T_0 \quad (14)$$

$$W(s) = \frac{T^2}{\rho_v} \left[\frac{\alpha_{v,1}}{f_1^2} e^{-\int_0^s \alpha_1 ds} - \frac{\alpha_{v,2}}{f_2^2} e^{-\int_0^s \alpha_2 ds} \right] \quad (15)$$

$$\begin{aligned} T_0 &= \int_0^\infty T \left[\frac{\alpha_{o,1}}{f_1^2} e^{-\int_0^s \alpha_1 ds} - \frac{\alpha_{o,2}}{f_2^2} e^{-\int_0^s \alpha_2 ds} \right] ds \\ &\quad + \int_0^\infty T \frac{\alpha_{l,2}}{f_2^2} \left[e^{-\int_0^s \alpha_1 ds} - e^{-\int_0^s \alpha_2 ds} \right] ds \end{aligned} \quad (16)$$

将式(8)和(14)比较, 解方程后可以得到

$$PD = a_0 + a_1 T_{B1} + a_2 T_{B2} \quad (17)$$

若 $W(s) = W_m$, 为常数, 带入比例系数后, 对应项系数可以写成:

$$\begin{aligned} a_0 &= \left[\frac{T_2}{f_2^2} - \frac{T_1}{f_1^2} - T_0 \right] \frac{k}{W_m} \\ a_1 &= \frac{k}{f_1^2 W_m} \\ a_2 &= -\frac{k}{f_2^2 W_m} \end{aligned} \quad (18)$$

多通道测量参数的湿度延迟的计算可由双通道的求解方式通过归纳法展开得到。当求解参数变为多通道数据, 可将测得的值和对应的遥感方程写成矩阵形式, 并通过式(18)类推求解相应参数。设通道数量为 N , 则同一时刻可以测得的亮温数据共有 N 组, 写成遥感方程:

$$\begin{bmatrix} T_{B1} \\ T_{B2} \\ \vdots \\ T_{BN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{B1} \\ T_{B2} \\ \vdots \\ T_{BN} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \int_0^{\infty} T\alpha_1 e^{-\int_0^s \alpha_1 ds} ds \\ \int_0^{\infty} T\alpha_2 e^{-\int_0^s \alpha_2 ds} ds \\ \vdots \\ \int_0^{\infty} T\alpha_N e^{-\int_0^s \alpha_N ds} ds \end{bmatrix} \quad (19)$$

按照两通道的分析方式, 带入 α_{liquid} 正比于 f^2 得:

$$\frac{T_{B1} - T_1}{f_1^2} - \sum_{n=2}^N \frac{T_{Bn} - T_n}{f_n^2} = \int_0^{\infty} W(s) \frac{\rho_v}{T} ds + T_0 \quad (20)$$

分别类推写出:

$$W(s) = \frac{T_0}{\rho_s} \left[\frac{\alpha_{s,1}}{f_1^2} e^{-\int_0^s \alpha_1 ds} - \sum_{n=2}^N \frac{\alpha_{s,n}}{f_n^2} e^{-\int_0^s \alpha_n ds} \right] \quad (21)$$

写入 T_0 时, 带入 $k = \frac{\alpha_{s,n}}{f_n^2}$, 则 T_0 可表示为:

$$T_0 = \int_0^{\infty} T \left[\frac{\alpha_{s,1}}{f_1^2} e^{-\int_0^s \alpha_1 ds} - \sum_{n=2}^N \frac{\alpha_{s,n}}{f_n^2} e^{-\int_0^s \alpha_n ds} \right] ds + \int_0^{\infty} T k \left[e^{-\int_0^s \alpha_1 ds} - \sum_{n=2}^N e^{-\int_0^s \alpha_n ds} \right] ds \quad (22)$$

则由两个通道结论按照归纳法可以求出多通道的湿度延迟公式为

$$PD = a_0 + \sum_{n=1}^N a_n T_{Bn} \quad (23)$$

同样, 若满足 $W(s) = W_m$, 为常数, 则其中对应项系数可表示为:

$$\begin{aligned} a_0 &= \left[\sum_{n=2}^N \frac{T_n}{f_n^2} - \frac{T_1}{f_1^2} - T_0 \right] \frac{k}{W_m} \\ a_1 &= \frac{k}{f_1^2 W_m} \\ a_n &= -\frac{k}{f_n^2 W_m} \end{aligned} \quad (24)$$

实际应用中, 其对应系数可由探空和进口辐射计历史数据采用样本训练法求得。在本次实验中, 采用测量水汽的通道数为 21, 即 $N = 21$, 则积分水汽可用式(23)求出。

2 MWP967KV 微波辐射计

MWP967KV 地基多通道微波辐射计(以下简称 967 微波辐射计)是专为气象和人工影响天气探测

而研制的精密仪器, 集成了 K 频段和 V 频段高性能的毫米波接收装置, 拥有 35 个遥感探测通道。基于历史探空资料, 系统可实现实时、连续大气温度及湿度分布等多种参数的遥测, 为中小尺度天气实时监测、预警、数值预报、天气研究和人工影响天气提供有价值的观测数据和决策依据。

967 微波辐射计利用 22.235GHz 水汽吸收峰及其右边带的谱型反演大气中水汽的垂直分布数据; 利用 60GHz 氧吸收峰及其左边带的谱型反演大气温度的垂直分布数据。系统预置的大气辐射探测接收频率集包含 35 个频率点, 其中 21 个分布于 22 ~ 30GHz 带内, 14 个分布于 51 ~ 59GHz 带内, 如图 1 所示。

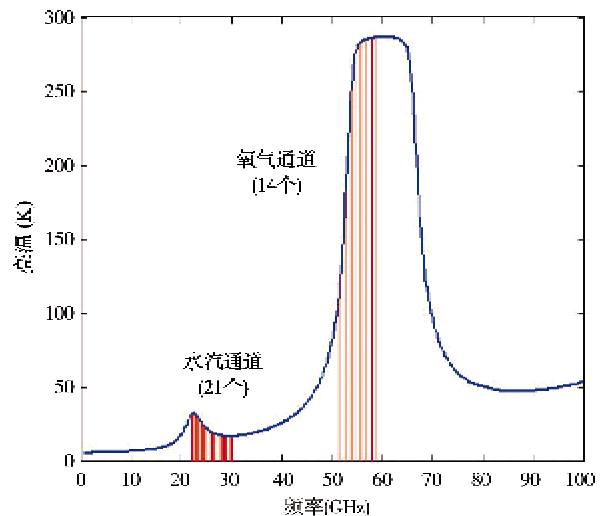


图 1 MWP967KV 微波辐射计通道分布及大气辐射亮温谱

本文主要研究位于水汽吸收谱线附近的 21 个通道测量结果来反演出积分水汽, 以检验上述算法的可行性, 并研究 MWP967KV 辐射计在可降水量估计方面的性能。

3 测量结果分析

2012 年春季和秋季, MWP967KV 微波辐射计在北京地区与进口微波辐射计及探空仪开展了累积超过 2000h 的探空观测对比试验。在试验期间, 多次经历晴空、多云、阴天、小雨、大雨、雨夹雪直至大雪等各种天气状况, 获得了丰富的试验数据, 选取典型的天气测量结果作为分析。

3.1 晴天测量数据

北京时间 5 月 14 日 9 时 43 分时刻, 进口辐射

计和 967 辐射计对空观测所得水汽带大气辐射强度谱的观测结果如图 2 所示,其通道误差均控制在 1K 以内,将 967 测得数据带入式(23),可以求出对应积分水汽为 7.74mm。

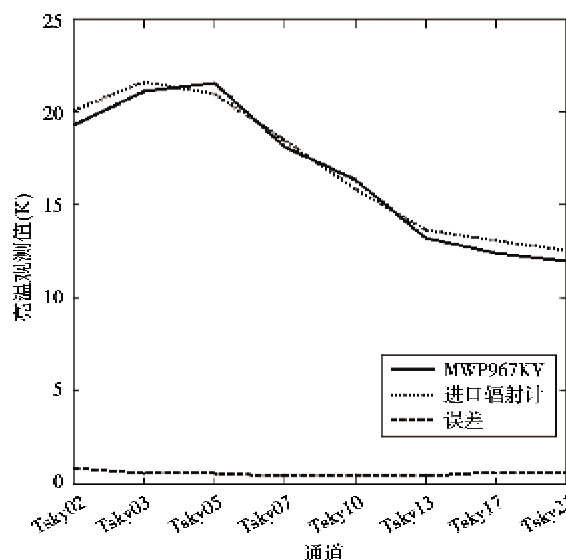


图 2 通道实测亮温数据(2012-05-14-09:43 UTC)

探空仪探空时间约为 30 分钟,在此过程中,探空仪将不同高度上的测量值看成了在同一时刻在不同高度上的测量值,当测量时间内天气变化较小时测量较为准确。图 3 给出了探空仪、国外进口辐射计和 MWP967KV 辐射计在 2012 年 9 月 22 日 00 时(UTC 时间)探空仪探测时间内测得的数据。其中辐射计测量数据为此时间内积累的数据平均值。

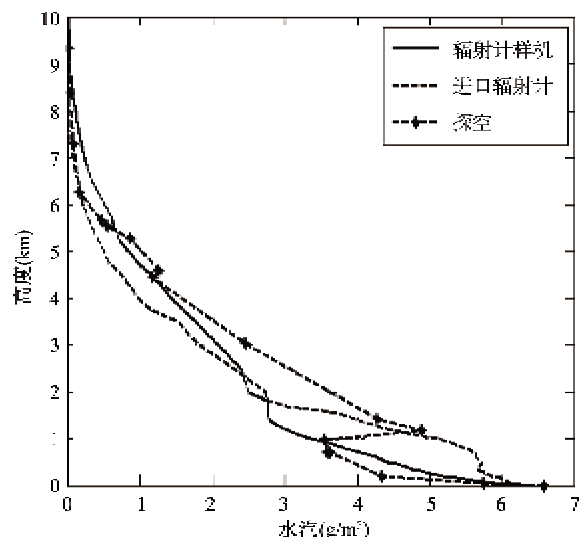


图 3 晴天水汽密度廓线(2012-09-22-00 UTC)

观察图 3 可看出,晴天条件下,探空仪、进口辐射计和国产辐射计测量结果基本吻合,以 3km 高度处的数据为例,探空仪测水汽密度为 3.72g/m^3 , MWP967KV 辐射计测得的平均水汽密度为 4.19g/m^3 , 国外进口辐射计测得的平均水汽密度为 3.49g/m^3 , 若与探空仪直接比较,按照上述反演算法算得的误差为 12.6%,国外辐射计误差为 6.6%,二者相差仅为 6.0%。三者的水汽密度廓线趋势大致相同,但在 1km 以下,误差较大,这是因为虽然辐射计试验场与无线电探空气球施放地点的直线距离并不太远,但市区与城郊之间的低空大气条件存在差别,因此会对检验结果产生一定的误差影响。但从试验过程和数据统计对比结果来看,辐射计样机测量大气辐射亮温及温湿廓线结果仍与无线电探空数据具有较好的一致性。可以预期,若辐射计工作场地靠近探空气球施放点,各项误差必将进一步减小(特别是低空数据),与同场地进口辐射计仪器的对比结果也为这一论断提供了有力的佐证。

3.2 雨天和雪天测量数据

北京时间 11 月 3 日 12 时和 11 月 4 日 00 时,分别于北京进行了雨天和雪天测量实验,此次实验主要为观测算法和辐射计雨雪天气的稳健性。

图 4 和图 5 分别给出了探空仪、国外进口辐射计和 MWP967KV 辐射计在探测时间内测得的积分水汽分布数据。

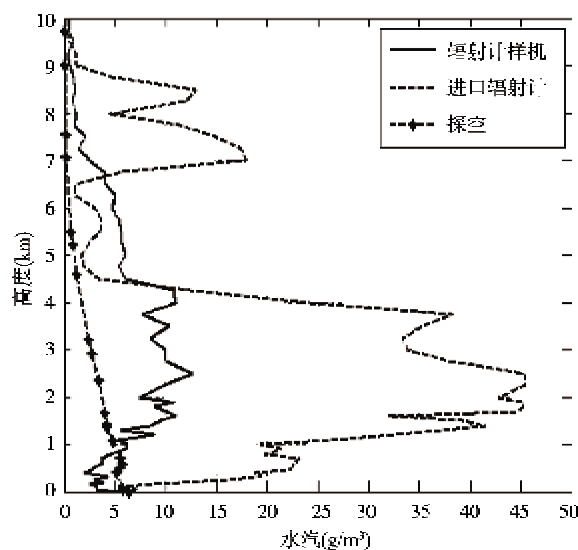


图 4 雨天水汽密度廓线(2012-11-03-12 UTC)

观察图 4 和图 5 可以发现,雨雪天气下,进口辐射计和国产辐射计测量结果基本吻合,以 1km 和

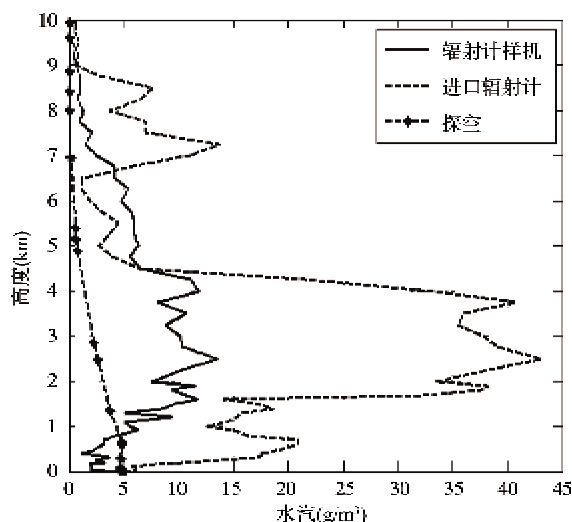


图 5 雪天水汽密度廓线(2012-11-04-00 UTC)

2km 高度处的数据为例, MWP967KV 辐射计在此时间内测得的平均水汽密度分别为 6.18g/m^3 和 5.54g/m^3 , 国外进口辐射计测得的水汽密度为 19.30g/m^3 和 12.45g/m^3 , 通过湿路径延迟推算积分水汽体积的办法适用于不同天气状况, 可广泛用于辐射计中积分水汽的计算工作, 具有很好的稳健性。此时探空仪测得数据相差很大, 这是因为探空仪测量一个水汽面需要将近 30min 的时间, 在这个时间内, 当天气发生较大变化时, 便会产生一定的误差, 因此在穿过云层后, 探空仪测得的数据已经不是可靠的当时的数据, 从而导致较大的误差。

实验期间在 5 月 13 日下午至晚间发生了间歇性的降雨, 图 6 给出了北京时间 16:45 ~ 22:49 时间内的实时反演出的水汽总量连续变化情况。

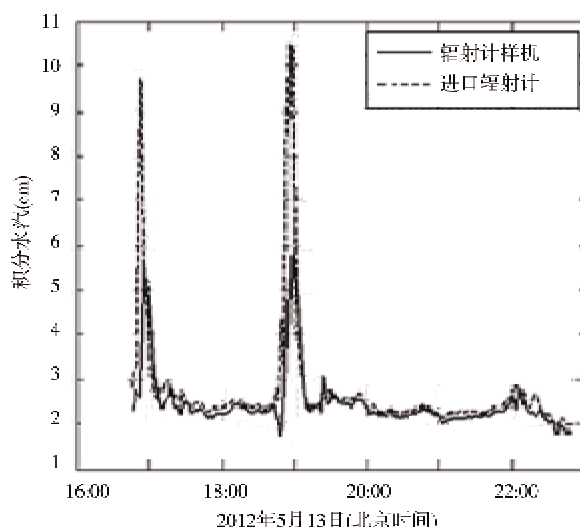


图 6 水汽总量演变图(2012-5-13-16:45 ~ 22:49)

其中两个尖峰时刻 16:54 及 18:57 与实际降雨时间吻合, 此时两种辐射计测得数据差别较大, 这与辐射计天线罩的浸湿程度、水滴附着厚度等因素有关, 其余时间二者的匹配度较高。

根据测量结果分析可以看出, 采用亮温和湿路径延迟求解积分水汽的方法和国外辐射计相比, 误差控制在 8% 以内, 满足实际工作要求。实际微波辐射计中还将其与高度因素以及氧气通道辐射结合从而可以实时监测大气温湿特性, 具有国内先进性。

4 结 论

由探空仪和 967 微波辐射计的对比可以看出, 967 微波辐射计采用亮温数据反演湿路径延迟求解积分水汽, 具有可行性, 可实时遥测大气积分水汽体积, 监测其变化过程。此种计算方法可以避免液态水的强烈辐射特性的影响, 较准确地测量出积分水汽体积, 和进口微波辐射计相比, 误差控制在了 8% 以内。对不同天气的实验表明, 此辐射计及其演算算法具有高精度和稳健的适应能力, 填补了国内微波毫米波大气遥感高端仪器的空白, 具有国内先进性。

参考文献

- [1] Qiu J H, Zhang R D. Design and analysis of 8mm radiometer used for passive millimeter-wave image system. *Imaging Systems and Techniques*, 2009. 22-25
- [2] 金燕波, 程显海, 曹培培. 用微波辐射计测量大气积分水汽的改进算法. *电波科学学报*, 2011, 26(5): 933-937
- [3] Schaper Jr L W, Staelin D H, Waters J W. The estimation of tropospheric electrical path length by microwave radiometry. *Proceedings of the IEEE*, 1970, 58(2): 272-273
- [4] Schoeberl M R, Douglass A R, Hilsenrath E, et al. Overview of the EOS Aura mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1066-1074
- [5] Wu S C. Optimum frequencies of a passive microwave radiometer for tropospheric path-length correction. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 1979, 27(2): 233-239
- [6] Elgered G. Tropospheric radio-path delay from ground based microwave radiometry. *Atmospheric remote sensing by microwave radiometry*, 1993. 1: 215
- [7] Wang Z, Zhang D. Simulation on retrieving of atmospheric wet path delay by microwave radiometer on HY-2 satellite

- lite. Microwave Conference, China-Japan Joint. IEEE, 2008. 665-668
- [8] 李成才,毛节泰,李建国等. 全球定位系统遥感水汽总

- 量. 科学通报,1999,44(3):333-336
- [9] 张祖荫,林士杰. 微波辐射测量技术及应用. 北京:电子工业出版社,1995. 10-25

An algorithm for retrieving atmospheric vapor content by multi-brightness temperature

Yu Ziping^{*}, Lu Jianping^{**}, Du Yunli^{*}, Wang Jinhua^{*}, Wang Dongji^{*}, Lei Lianfa^{**}

(^{*} China Research and Development Academy of Machinery Equipment, Beijing 100089)

(^{**} Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an 710100)

Abstract

Aiming at the performance insufficiency of a single-path microwave radiometer in water vapor measurement, a study of using a multi-path microwave radiometer to measure the brightness temperature of different wave bands was conducted, and an algorithm for retrieval of the atmospheric water vapor content from brightness temperature data were proposed. By implementing the algorithm, the MWP967KV, a novel dual frequency, multi channel domestic radiometer, was successfully developed. Using the instrument, a two-month measurement work for measuring Beijing water vapor in 2012 was carried out, and the data was compared with that of the imported radiometer and the radiosonde. It was found that by using the algorithm, the spectrum interference caused by the strong thermal radiation of the liquid water droplets can be effectively reduced, and a precise result of the water vapor can be achieved with the measurement errors below 6% and 8% in fine and sleet days respectively. The algorithm and the instrument have the great stability and little environment dependence, which is suitable for various conditions.

Key words: microwave radiometer, water vapor density, wet delay, brightness temperature